負の浮力を持って斜面上に表層放出される 三次元密度噴流の流動・拡がり機構について*

中井 正則**, 有田 正光***, 梅基 淳****

Flow and Spreading Mechanism of Three-Dimensional Negatively Buoyant Jets Discharged on a Sloping Bottom

Masanori NAKAI, Masamitsu ARITA and Jun UMEMOTO

ABSTRACT

The flow and spreading mechanism of three-dimensional negatively buoyant surface jets discharged on a sloping bottom was experimentally investigated by flow visualization and exhaustive temperature measurement. The flow gradually varies, through its running process, from a jet-like characteristic to a buoyancy-dominating characteristic which has great lateral spreading in surface and bottom layers and apparent constriction in a middle layer. Streamwise variations of spreading widths in upper and lower layers were made clear as a function of initial densimetric Froude number Fo , and their features were discussed associated with the flow characteristics. In addition, a hypothesis on the flow and spreading mechanism in the buoyancy-dominating region could be presented through physical consideration.

Keywords : Three-dimensional negatively buoyant surface jets, Jet-like spreading, Buoyant spreading, Constriction in a middle layer

1. はじめに

負の浮力を持って斜面上に表層放出される密度噴流は、洪水時における河川濁水の貯水池への流入や LNG プラントから海域への冷排水の放流などにおいて見られる現象であり、環境科学上の重要な研究課題である。

この現象について、二次元の場合を対象にした研究が現在までに多数実施されてきている。これらの研究において注目されている問題の一つは密度噴流の底層への潜り込みであり、福岡・福岡・中村¹⁾, Akiyama and Stefan²⁾, 有田・塚原³⁾らにより理論的、実験的に検討が行われてきた。また、もう一つの重要な問題である潜り点下流の底層傾斜密度流の挙動についても、古くから検討がなされてきている⁴⁾。さらに、最近はこの問題に対して理論的・実験的研究のみならず、数値解析、現場観測の観点からの研究も行われている^{5)~6)}。以上のように、二次元の場合には、現象の詳細がかなり明らかになってきている。

一方、三次元の場合については、Hauenstein and Dra-

cos⁷⁾, Tsihrintzis and Alavian⁸⁾, 著者ら^{9)~11)}の研究が挙げられる程度であり、ほとんど研究がなされていない。著者らはこれまでに三次元の場合を実験的・理論的に取り扱い、現象の概略の解明および基礎データの提供を行ったが、現象の物理機構を十分明らかにするには至らなかった(著者らの知見については、2.で述べる)。このように、三次元現象の場合はその基本特性さえ不明な点が多い。

本研究では、負の浮力を持って斜面上に表層放出される三次元密度噴流の潜り点より上流側の流動・拡がり機構を、流れの可視化および多点計測により実験的に詳しく考察した。

2. 現象の概要

Fig. 1 に本研究で取り扱う現象の模式図および記号、座標系の定義を示す。同図に示すように、負の浮力を持った三次元密度噴流が放出密度フルード数 Fo で斜面勾配 S の斜面上に水平に放出され、放出口から距離 Lp だけ流下した後に水面下に潜り込み、斜面上を傾斜密度流として流下する。ここに、 Fo は $Fo = Uo / \{ (\Delta\rho o / \rho a) g Ho \}^{1/2}$, Uo は放出流速, $\Delta\rho o (= \rho o - \rho a)$ は放出口における密度差, ρo は放出水の初期密度, ρa は周囲水の密度, Ho は放出口水深, g は重力の加速度である。なお、既述の

* 原稿受付 1999 年 8 月 27 日

** 東京電機大学 理工学部

*** 正会員 東京電機大学 理工学部

**** 東京電機大学 大学院

Fig. 1 Outline of flow and definition sketches

ように、本研究では放出口～密度噴流の潜り点の間のみを考察の対象とする。

この現象について著者らが既に得ている知見^{9)~11)}を要約すると、以下の様である。潜り点より上流側では、密度噴流は Fo が大きく S が小さいほど噴流の特性が強くなり、 Fo が小さく S が大きいほど密度流の特性が強くなる。また、密度噴流は (Fo が極端に小さくない限り) 放出直後には噴流的特性が強いものの、流下とともに噴流的特性は弱くなり、代わって密度流の特性が強くなる。なお、噴流的特性を持つ密度噴流とは密度流効果に比較して流れの慣性力が支配的な噴流であり、その流動機構は均質噴流に類似している。この場合、密度噴流は強い水平連行を伴いながら直線状に広がる。一方、密度流の特性を持つ密度噴流とは流れの慣性力に比較して密度流効果による拡がり支配的な噴流である。この場合、周囲水の連行は生じず、流れは密度流として円状に拡がることになる (両特性の詳細は文献¹²⁾を参照されたい)。

3. 実験装置と実験方法

実験装置には、Fig. 2 に示すような約 $6.0\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ の平面水槽を用いた。同水槽に密度噴流を放出するための幅 $b_0 = 0.050\text{ m}$ の水路、および斜面を模擬するためのアクリル板 ($1.5\text{ m} \times 1.6\text{ m}$) を取り付けた。また、実験中の水槽内水深を一定に保つために、水槽の下流端に排水装置 (多孔管) を設置した。

実験では、水槽内の水道水中へ冷水を放出することにより負の浮力を持つ密度噴流を作り出し、流況の可視化および多点の水温測定を実施した。流況の可視化では、フルオレセインナトリウム溶液にアルミニウム粉末を投入したものをトレーサとして用い、スリット光を照射す

Fig. 2 Experimental apparatus used

Table 1 Experimental conditions

Run	Fo	S	To ($^{\circ}\text{C}$)	Ta ($^{\circ}\text{C}$)	Q (m^3/s)
1	6.5	1/5	21.0	25.0	2.5×10^{-4}
2	12.3	1/10	17.3	20.6	4.0×10^{-4}
3	6.3	1/10	15.3	19.0	2.0×10^{-4}
4	3.1	1/10	15.4	19.1	1.0×10^{-4}
5	2.9	1/10	10.6	16.4	1.0×10^{-4}
6	4.2	1/10	13.2	18.4	1.5×10^{-4}
7	6.1	1/10	14.2	18.4	2.0×10^{-4}
8	7.5	1/10	14.1	18.4	2.5×10^{-4}
9	11.8	1/10	16.0	20.0	4.0×10^{-4}
10	12.5	1/10	16.0	19.6	4.0×10^{-4}
11	2.2	1/10	22.9	27.8	1.0×10^{-4}
12	3.8	1/10	24.0	27.8	1.5×10^{-4}
13	6.3	1/10	24.0	27.8	2.5×10^{-4}
14	8.7	1/10	24.9	27.7	3.0×10^{-4}
15	2.3	1/40	12.6	19.9	1.0×10^{-4}
16	4.1	1/40	15.2	19.9	1.5×10^{-4}
17	6.1	1/40	16.1	19.8	2.0×10^{-4}
18	8.5	1/40	15.1	19.6	3.0×10^{-4}
19	12.3	1/40	16.0	19.7	4.0×10^{-4}

To : Initial temperature in released water

Ta : Temperature in ambient water

Q : Discharge

ることによって密度噴流の横断面内流況を可視化し、目視観察およびビデオカメラによる撮影を行った。また、水温の測定はサーミスタ型温度計を用いて、密度噴流の拡がり領域全体にわたって行った。なお、測定時間は 30 s 間とし、その間の平均水温を求めた。

Table 1 に今回実施した実験ケースの一覧を示す。同表に示すように、斜面勾配 S は $S = 1/5, 1/10, 1/40$ の 3 通り、放出密度フルード数 Fo は $Fo = 2 \sim 13$ 程度とした。また、放出口水深 H_0 は全ケースを通じて $H_0 = 0.040\text{ m}$ に固定した。

Fig. 3 Cross-sectional spreading visualized by dye with Al flakes (Run 1: $Fo = 6.5$, $S = 1/5$)

4. 実験結果

ここでは、これまでに得られている知見 (2. 参照) を踏まえて今回の実験結果について考察する。

4.1 横断面内の流況

Fig. 3 は Run 1 ($Fo = 6.5$, $S = 1/5$) における $x/Ho = 1.25$, 5.0 , 10.0 での密度噴流の横断面内流況の可視化写真を示したものである。また、Fig. 4 は各横断面の流況の模式図である。ここで斜面勾配 S が大きいケースを選んだのは、水深が大きく可視化による流況の把握が容易であるためである。

Fig. 3(a), Fig. 4(a) は放出口に近い $x/Ho = 1.25$ のものである。これより、密度噴流の横断面形状は底層がやや拡がっているものの、ほぼ矩形であり、均質噴流のそれと類似していることがわかる。これは放出口近傍で噴流的拡がり卓越していることを示している。また、Fig. 3(b), Fig. 4(b) は放出口より若干離れた $x/Ho = 5.0$ のものであるが、密度噴流の底層が拡がる傾向にあり、中間層に弱いくびれが見られる。このくびれは、底層の拡がりに伴って中間層から底層へ向かう流れが生じるためと考えられる。さらに、Fig. 3(c), Fig. 4(c) に潜り点より若干上流の $x/Ho = 10.0$ の結果を示す。これより、密度噴流の表層および底層の拡がりが激しいこと、中間層に顕著なくびれが生じていることがわかる。

Fig. 3(c), Fig. 4(c) における底層の大きな拡がりは密度流効果によるものであり、既に報告したものであるが⁹⁾、表層の大きな拡がりは今回の実験で初めて観察されたものである。この表層の拡がりは密度流効果として簡単に説明できるものではなく、密度流的拡がりという表現は不適切かもしれない。しかし、この拡がりが密度流効果によって底層が大きく拡がる場合に同時に観察されることより、ここでは表層の拡がりについても密度流的拡がりと呼ぶことにする (この現象については、次章で考察する)。なお、実験時の観察より、表層付近および底層付近に互いに逆向きの循環を持つ一対の縦渦が (流軸の

Fig. 4 Sketches of cross-sectional spreading (Run 1: $Fo = 6.5$, $S = 1/5$)

左右それぞれに) 存在すること、この渦対に挟まれる領域 (中間層) に周期的な水平連行が生じることが判明している (Fig. 4(c) 参照)。

4.2 偏差温度 ΔT の横断面内分布

可視化によって得られた横断面内流況を定量的に把握するために、横断面内の水温分布 (時間平均値) を測定した。なお、 Fo による変化を調べるために S を一定として ($S = 1/10$), $Fo = 12, 6, 3$ 程度の 3 ケース (Run 2~4) の実験を実施した。

Fig. 5(a) は 3 ケースの中で Fo が最も大きい Run 2 ($Fo = 12.3$) を選び、放出口近傍~潜り点付近における横断面内の無次元偏差温度 $\Delta T/\Delta T_o$ のコンターラインを示したものである。ここに、 ΔT は偏差温度 (= 周囲水の水温 T_a - 密度噴流の水温 T)、 ΔT_o は放出口における偏差温度 ΔT である。同図より、 $x/Ho \leq 10$ では密度噴流は周囲水の連行による希釈を伴いながら横断方向に徐々に拡がっていること、その拡がりは水深方向にほぼ一様であることがわかる。また、密度噴流の横断面形状は Fig. 4(a) に対応しており、この領域では噴流的特性が強いことがわかる。これに対して、 $x/Ho = 15$ では底層に拡がりが見られ、また、中間層に弱いくびれが見られる。

一方、Fig. 5(c) は 3 ケースの中で Fo が最も小さい Run 4 ($Fo = 3.1$) の実験結果を示している。同図のように、 $x/Ho = 1.5$ における $\Delta T/\Delta T_o$ のコンターラインは底層がやや拡がっているものの、Fig. 4(a) と比較的類似の形状を示している。 $x/Ho = 2.5$ では底層の拡がりが大きく、中間層に弱いくびれが生じており、コンターラインは Fig. 4(b) と類似の形状となっている。また、 $x/Ho = 3.75$ では底層の拡がりがさらに大きくなっており、中間層のくびれは消失している。この 2 断面の結果

(a) Run 2 ($Fo = 12.3, S = 1/10$)Fig. 5 Contour-lines of dimensionless temperature difference $\Delta T / \Delta T_0$ in cross-sections

は、密度噴流の持つ過剰密度に基づく侵入力により底層が拡がり、それに伴って中間層から底層へ向かう流れが生じるために弱いくびれが発生し、その後表層水が底層へ引き込まれることによってくびれが消失する現象と解釈できる。さらに、 $x/Ho = 5$ では表層および底層の激しい拡がりや中間層の顕著なくびれ現象が計測されており、コンターラインは Fig. 4(c) の形状と良く一致している。

このケースの4断面の結果について流動特性を分類すると、 $x/Ho = 1.5, 5$ はそれぞれ噴流的特性、密度流的特性と考えられ、 $x/Ho = 2.5, 3.75$ が遷移状態に該当

する。なお、 $x/Ho = 5$ のくびれの発生機構は $x/Ho = 2.5$ におけるそれとは本質的に異なるものと推察される（その詳細については、次章参照）。

Fig. 5(b) は3ケースの中で Fo が中間的な Run 3 ($Fo = 6.3$) の実験結果であり、その特徴は Fig. 5(a) と Fig. 5(c) の中間的なものとなっている。なお、 $x/Ho = 2.5$ の結果は Fig. 4(b) によく対応しており、噴流的特性から密度流的特性への遷移状態を表していると考えられる ($x/Ho = 3.75$ も遷移状態の結果である)。

(a) $S = 1/10$ (b) $S = 1/40$ Fig. 6 Streamwise variations of dimensionless spreading width in surface layer $b/(b_o/2)$

4.3 表層および底層の拡がり幅 b , b_B の流下方向変化

Fig. 6 は表層 ($z_b = 5.0 \times 10^{-3} \text{ m}$) における偏差温度 ΔT の横断方向分布より求めた無次元表層拡がり幅 $b/(b_o/2)$ の流下方向変化を示している。ここに、 b は流軸 ($y=0$) から $\Delta T/\Delta T_c = 1/e$ (ΔT_c : 表層における流軸上の偏差温度 ΔT , e : 自然対数の底) となる位置までの y 方向距離, b_o は放出口幅である。

同図より, Fo が小さいケース (Run 5~7, 15~16) では S の値によらず, 拡がり率 (db/dx) が流下途中 (図中の矢印) で急激に大きくなることわかる (矢印には Run 番号を付けてある。なお, 矢印およびプロットの

Fig. 7 Streamwise variations of dimensionless spreading width in bottom layer $b_B/(b_o/2)$ ($S = 1/10$)

近似曲線の挿入は図の見易さを考慮して, 特性が顕著に現れているケースに限定してある)。これは, 密度噴流の拡がり矢印の位置付近で噴流的拡がりから密度流的拡がりへ遷移するためである。また, その位置は Fo が大きいほど下流側に現れる。さらに, 矢印より下流では Fo が小さいほど密度流的特性が強くなり, 拡がり率 (db/dx) が大きくなっていることがわかる。 $S = 1/10$ のケースの一部でこの特性が逆転しているが, これは測定誤差によるものと考えられる。

一方, Fo が十分大きいケース (Run 8~10, 18~19) では, 図中に示した範囲において噴流的特性が強く, 拡がり率 (db/dx) が流下途中で大きく変化する傾向は見られない (ただし, 十分下流では db/dx が急増大すると考えられる)。また, 放出口近傍においては, b は Fo にほとんど依存しない。これは, Fo が一定値以上になると, 放出口近傍で噴流的特性が卓越することを意味している。

Fig. 7 は底層 ($z_b = 5.0 \times 10^{-3} \text{ m}$, z_b : 底面からの距離; Fig. 1 参照) における偏差温度 ΔT の横断方向分布より求めた無次元底層拡がり幅 $b_B/(b_o/2)$ の流下方向変化を示している。同図において, b_B は流軸 ($y=0$) から $\Delta T/\Delta T_c = 1/e$ (ΔT_c : 底層における流軸上の偏差温度 ΔT) となる位置までの y 方向距離である。同図より, b_B は Fo が小さいほど密度流効果により大きくなっていることがわかる。また, 表層の拡がり幅 b (Fig. 6 参照) と異なり, いずれのケースにおいても流下途中で拡がり率 (db_B/dx) が大きく変化する現象は見られない。つまり, 密度噴流の拡がり噴流的拡がりから密度流的拡がりへ遷移する過程において, b_B の値は緩やかに増大していく。

5. 考察

本章では, 実験結果のまとめと考察を行い, 負の浮力を持って斜面上に表層放出される三次元密度噴流の流動・拡がり機構について一つの仮説を提唱する。

Fig. 8 Sketches of streamwise variation of flow spreading

Fig. 3~7の結果より, 密度噴流の拡がり特性を模式的にまとめたものが Fig. 8である。密度噴流は放出直後には噴流的特性を示すが (Fig. 8の断面①), 流下とともに徐々に慣性力が弱まり, 遷移状態へ移行する。遷移領域では密度噴流の底層が大きく拡がり, 中間層・表層から底層へ向かう流れが生じる。また, それに伴って中間層に弱いくびれが一旦生じ(断面②), その後消失する(断面③)。遷移領域を過ぎると密度流的特性が強くなり, 密度噴流の表層にも大きな拡がりが生じ, 中間層には顕著なくびれが形成される(断面④)。その後, 密度噴流は潜り点に達し, 底層へ潜り込んでいく(断面⑤, ⑥)。

ここで, 密度噴流の流動機構について考察する。まず, 縦断面内流況について考えると, 密度噴流は密度流的特性領域に達すると慣性力が弱まるために, 負の浮力によって下方へ潜り込み始める。僅かに潜り込んだ状態において, (密度噴流に慣性力が残っているために) 表層からの周囲水の連行が生じるが, このときの連行速度は空間(周囲水領域)が狭いために大きく, 表層の周囲水は低圧になり, 潜り込み始めた密度噴流は表層へ引き戻される。つまり, 密度噴流は一種のコアンダ効果によって表層へ再付着する。その後, 密度噴流は再び潜り込み

Fig. 9 Sketches of flow and spreading mechanism in buoyancy-dominated region

Fig. 10 Pulsating flow ($Fr = 3.0$, $S = 1/3$)¹³⁾

始め, 先と同様の挙動を繰り返す。この一連の挙動の繰り返しの後, 密度噴流はほぼ完全に慣性力を失い, 底層へ潜り込んでいく (Fig. 9(a)参照)。ここでは, 同図中の波状流れを脈動流と呼ぶが, これは既に可視化によって検証されているものである (Fig. 10参照¹³⁾)。なお, この脈動流は三次元現象に特有のものであり, 二次元現象では横方向からの表層水の補給がないため, 密度噴流の再付着は生じない。

つぎに, 密度噴流の横断面内流況について考える。潜り込み始めた密度噴流が表層の圧力低下によって表層へ引き戻される際に, それに伴って中層水が表層へ引き込まれ, 水面付近を渦を形成しながら拡がる。また, この中層水の上昇を補償するために中間層に水平連行が生じ, その結果, Fig. 4(c)のような横断面内流況が形成される (Fig. 9(b)参照)。結局, 密度の大きい放出水が重力に逆らって表層を大きく拡がる原因は, 潜り込み始めた密度噴流の表層への再付着に伴う中層水のリフトアップと考えられる。以上がここで新たに提案する密度噴流の流動機構(密度流的特性領域)に関する仮説である。なお, 密度噴流の底層が大きく拡がる原因は密度流効果, つまり(過剰密度による)圧力上昇に基づく侵入力である。

前述のように, 脈動流 (Fig. 9(a), Fig. 10参照)は密度噴流の流動機構に重要な影響を与えるが, 同時に潜り点の位置にも影響を与えるものと考えられる。二次元

の場合には、密度噴流は一旦潜り込み始めるとそのまま底層へ向かうが、三次元の場合には表層へ再付着して脈動流を形成する。つまり、脈動流は潜り点までの距離を大きくする効果を持っている。また、三次元の場合には潜り点の位置が時間的に大きく変化する（流れ方向に前後する）が、これは脈動流による密度噴流の揺らぎが原因と考えられる（二次元の場合には、潜り点の変動はほとんどない）。

6. むすび

本研究では、負の浮力を持って斜面上に表層放出される三次元密度噴流の流動・拡がり機構（潜り点より上流側）について、実験的に考察を行った。以下に、本研究より得られた主要な結論を列挙してむすびとする。

- (1) 密度噴流は放出口より一定の距離を流下すると、噴流的特性が弱くなり、遷移状態へ移行する。遷移状態では、密度噴流は底層が大きく拡がり、表層・中間層から底層へ向かう流れが生じる。さらに流下すると、密度流的特性が強くなり、密度噴流の表層にも激しい拡がりが生じ、中間層に顕著なくびれが形成される。
- (2) 密度噴流の表層および底層における無次元拡がり幅の流下方向変化を、放出密度フルード数 Fo をパラメータにして明らかにした。また、その結果について、上記(1)の流動・拡がり機構と関連付けて考察した。
- (3) 上記(1)の流動・拡がり機構について物理的考察を行い、1つの仮説を提案した。同仮説中で三次元現象に特有な脈動流の存在を示し、これが密度噴流の流動・拡がり機構に支配的な影響を与えていることを指摘した。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 福岡祐介, 中村健一: 2次元貯水池密度流の潜り込み水深と界面形状, 土木学会論文報告集, 302, (1980) pp. 55-65.
- 2) Akiyama, J. and Stefan, H. G.: Plunging flow into a reservoir: Theory, J. Hydr. Engrg. (ASCE), 110-4, (1984) pp. 484-499.
- 3) 有田正光, 塚原千明: 貯水池密度流の潜り点の水理条件に関する実験的研究, ながれ, 15-5, (1996) pp. 409-416.
- 4) Turner, J. S.: Buoyancy effects in fluids, Cambridge Univ. Press, (1973) pp. 178-186.
- 5) 福岡祐介: 乱流モデルによる傾斜壁面密度噴流の解析, 土木学会論文集, 399 (II-10), (1988) pp. 65-74.
- 6) 石川忠晴, 長尾正之, 長島伸介: 小川原湖に発生する傾斜ブルームの連行係数に関する考察, 水工学論文集, 40, (1996) pp. 595-600.
- 7) Hauenstein, W. and Dracos, T.: Investigation of plunging density currents generated by inflows in lakes, J. Hydr. Res., 22-3, (1984) pp. 157-179.
- 8) Tsihrintzis, V. A. and Alavian, V.: Spreading of three-dimensional inclined gravity plumes, J. Hydr. Res., 34-5, (1996) pp. 695-710.
- 9) 有田正光, 中井正則, 渡辺 徹, 梅基 淳: 負の浮力を持って斜面上に表層放出される三次元密度噴流に関する実験, 水工学論文集, 42, (1998) pp. 535-540.
- 10) 渡辺 徹, 有田正光, 中井正則: 負の浮力を持って斜面上に表層放出される三次元密度噴流に関する積分モデル, 土木学会第53回年次学術講演会概要集第II部, (1998) pp. 824-825.
- 11) 梅基 淳, 有田正光, 中井正則: 負の浮力を持って斜面上に表層放出される三次元密度噴流の流動機構, 土木学会第54回年次学術講演会概要集第II部, (1999) pp. 560-561.
- 12) 有田正光編: 水圏の環境, 東京電機大学出版局, (1998) pp. 173-175.
- 13) 曾我 亮: 貯水池密度流の挙動に関する研究, 東京電機大学修士論文, (1995).